

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant(s): Lin-Ying HU, et al
Serial No.:
Filed: March 2, 2001
Title: METHOD INTENDED FOR GRADUAL DEFORMATION OF
SEQUENTIAL SIMULATIONS OF A HETEROGENEOUS
MEDIUM SUCH AS AN UNDERGROUND ZONE
Group:

LETTER CLAIMING RIGHT OF PRIORITY

Honorable Commissioner of
Patents and Trademarks
Washington, D.C. 20231

March 2, 2001

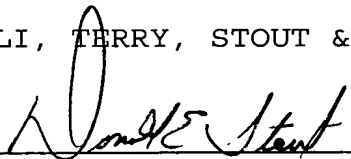
Sir:

Under the provisions of 35 USC 119 and 37 CFR 1.55, the
applicant(s) hereby claim(s) the right of priority based on
French Patent Application No.(s) 99/08605 filed July 2, 1999.

A certified copy of said French Application is attached.

Respectfully submitted,

ANTONELLI, TERRY, STOUT & KRAUS, LLP



Donald E. Stout
Registration No. 26,422

DES/nac
Attachment
(703) 312-6600

THIS PAGE BLANK (USPTO)



9/786232

JC12 Rec'd PCT/PTO 02 MAR 2001

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

- Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 17 JUIL. 2000.

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

BEST AVAILABLE COPY

Martine PLANCHE

THIS PAGE BLANK (USPTO)

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

Confirmation d'un dépôt par télécopie ☐

Cet imprimé est à remplir à l'encre noire en lettres capitales

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 93 59 30

Réservé à l'INPI

DATE DE REMISE DES PIÈCES 02107/99

N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL 9908605

DÉPARTEMENT DE DÉPÔT 99

DATE DE DÉPÔT

02 JUL 1999

1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE
À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE

INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE
DEPARTEMENT BREVETS
1 & 4 Avenue de Bois Préau
92852 RUEIL MALMAISON CEDEX FRANCE

n° du pouvoir permanent JC/CLN références du correspondant 01 47.52.60.00
téléphone

2 DEMANDE Nature du titre de propriété industrielle

☒ brevet d'invention

☐ demande divisionnaire

☐ certificat d'utilité

☐ transformation d'une demande
de brevet européen

☐ demande initiale

☐ brevet d'invention

☐ certificat d'utilité n°

date

Établissement du rapport de recherche

☐ différé ☒ immédiat

Le demandeur, personne physique, requiert le paiement échelonné de la redevance

☐ oui ☒ non

Titre de l'invention (200 caractères maximum)

**METHODE POUR DEFORMER GRADUELLEMENT DES SIMULATIONS SEQUENTIELLES D'UN
MILIEU HETEROGENE TEL QU'UNE ZONE SOUTERRAINE**

3 DEMANDEUR (S) n° SIREN

code APE-NAF

Nom et prénoms (souligner le nom patronymique) ou dénomination

INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE
et
ELF EP

Forme juridique

Organisme Professionnel
Société Anonyme

Nationalité (s)

françaises

Adresse (s) complète (s)

Pays

1 & 4 Avenue de Bois Préau 92852 RUEIL MALMAISON cedex
Tour Elf, 2 place de la Coupole, La Défense 6, 92400 Courbevoie

FRANCE
FRANCE

En cas d'insuffisance de place, poursuivre sur papier libre ☐

4 INVENTEUR (S) Les inventeurs sont les demandeurs

☐ oui

☒ non

Si la réponse est non, fournir une désignation séparée

5 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES

☐ requise pour la 1ère fois

☐ requise antérieurement au dépôt ; joindre copie de la décision d'admission

6 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE

pays d'origine

numéro

date de dépôt

nature de la demande

7 DIVISIONS

antérieures à la présente demande n°

date

n°

date

8 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (nom et qualité du signataire) 422-5/PP.303
J. COADOUR

Ingénieur Principal

SIGNATURE DU PRÉPOSÉ À LA RÉCEPTION SIGNATURE APRÈS ENREGISTREMENT DE LA DEMANDE À L'INPI

DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08


Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 93 59 30

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1./1.

(Si le demandeur n'est pas l'inventeur ou l'unique inventeur)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 W /260899

Vos références pour ce dossier (facultatif)		4530/00/JC	
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL		99/08605	
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) METHODE POUR DEFORMER GRADUELLEMENT DES SIMULATIONS SEQUENTIELLES D'UN MILIEU HETEROGENE TEL QU'UNE ZONE SOUTERRAINE			
LE(S) DEMANDEUR(S) : INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE			
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) : (Indiquez en haut à droite «Page N° 1/1» S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez un formulaire identique et numérotez chaque page en indiquant le nombre total de pages).			
Nom		HU	
Prénoms		Lin-Ying	
Adresse	Rue	4 rue Louis Borthou	
	Code postal et ville	64140	Billere
Société d'appartenance (facultatif)			
Nom		NOETINGER	
Prénoms		Benoît	
Adresse	Rue	57 rue Emile Guichenné	
	Code postal et ville	64000	Pau
Société d'appartenance (facultatif)			
Nom			
Prénoms			
Adresse	Rue		
	Code postal et ville		
Société d'appartenance (facultatif)			
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire) Alfred ELMALEH, Chef du Département Brevets N° 422-5/PP.253			

La présente invention a pour objet une méthode pour déformer graduellement des représentations ou réalisations, générés par simulation séquentielle, d'un modèle stochastique non nécessairement gaussien d'un milieu hétérogène, en se basant sur un algorithme de déformation graduelle de
5 modèles stochastiques gaussiens.

La méthode selon l'invention trouve des applications dans la modélisation de zones souterraines où il s'agit de générer des représentations montrant comment est distribuée une certaine grandeur physique dans une zone du sous-sol (la perméabilité z par exemple), qui soient compatibles au
10 mieux avec des données observées ou mesurées : données géologiques, enregistrements sismiques, mesures obtenues dans des puits notamment mesures des variations au cours du temps de la pression et du débit de fluides issus d'un gisement etc.

Etat de la technique

15 Par la demande de brevet FR 98/09.018, on connaît une méthode pour déformer graduellement un modèle stochastique (de type gaussien ou apparenté) d'un milieu hétérogène tel qu'une zone souterraine, contraint par une ensemble de paramètres relatifs à la structure du milieu. Cette méthode comporte le tirage d'un nombre p ($p=2$ par exemple) de réalisations (ou
20 représentations) indépendantes du modèle ou d'une partie au moins du modèle choisi du milieu, parmi l'ensemble de toutes les réalisations possibles et une ou plusieurs étapes itératives de déformation graduelle du modèle en effectuant une ou plusieurs combinaisons linéaires successives de p réalisations initiales indépendantes entre elles puis des réalisations composites
25 successivement obtenues éventuellement avec de nouveaux tirages, etc., les

coefficients de cette combinaison étant tels que la somme de leurs carrés est égale à 1.

Les modèles gaussiens ou apparentés conviennent pour modéliser des champs de grandeurs continues et, de ce fait, sont mal adaptés à la
 5 modélisation de zones traversées par des réseaux de fractures ou des systèmes de chenaux, par exemple.

On connaît par ailleurs les algorithmes dits de simulation séquentielle, les plus largement utilisés parmi les algorithmes de simulation géostatistique. Bien qu'ils conviennent particulièrement pour la simulation des modèles
 10 gaussiens, il n'impliquent pas en principe une limitation à ce type de modèle.

On forme une représentation géostatistique d'une zone souterraine par exemple en la subdivisant par un réseau à N mailles et en déterminant un vecteur aléatoire à N dimensions $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$ correspondant au mieux à des mesures ou observations obtenues sur la zone. Comme le montre par
 15 exemple Johnson, M.E. ; in « Multivariate Statistical Simulation » ; Wiley & Sons, New York, 1987, cette approche réduit le problème de la création d'un vecteur à N dimensions à une série de N problèmes mono-dimensionnels. Un tel vecteur aléatoire n'est ni nécessairement multi-gaussien ni stationnaire. La simulation séquentielle de Z implique d'abord la définition d'un ordre selon
 20 lequel les N éléments (Z_1, Z_2, \dots, Z_N) du vecteur Z sont générés l'un après l'autre. Sans rien perdre de généralité, on suppose que les N éléments de Z sont générés en séquence depuis Z_1 jusqu'à Z_N . Pour tirer une valeur de chaque élément Z_i , ($i = 1, \dots, N$), il faut réaliser les opérations suivantes :

a) construire la distribution de Z_i conditionnée par $(Z_1, Z_2, \dots, Z_{i-1})$

$$F_c(z_i) = P(Z_i \leq z_i / Z_1, Z_2, \dots, Z_{i-1}) ; \text{ et}$$

b) tirer une valeur de Z_i de la distribution $F_c(z_i)$.

Dans la pratique de la géostatistique, la simulation séquentielle est utilisée fréquemment pour engendrer des vecteurs multi-gaussiens et des
 5 vecteurs d'indicateur non-gaussiens. La tâche principale de la simulation séquentielle est la détermination des distributions conditionnelles $F_c(z_i)$ ($i = 1, \dots, N$). Des algorithmes et logiciels pour estimer ces distributions sont décrits par exemple dans :

- Deutsch, C.V. et al, « GSLIB (Geostatistical Software Library) and User's
 10 Guide » ; Oxford University Press, New York, Oxford 1992.

En ce qui concerne le tirage des valeurs à partir de la distribution $F_c(z_i)$, il existe aussi un vaste ensemble d'algorithmes connus.

On considère la méthode de distribution inverse par laquelle on obtient une réalisation de Z_i : $z_i = F_c^{-1}(u_i)$, où u_i est tiré d'une distribution uniforme
 15 entre 0 et 1. Il s'ensuit qu'une réalisation du vecteur Z correspond à une réalisation du vecteur U dont les éléments U_1, U_2, \dots, U_N , sont mutuellement indépendants et uniformément distribués entre 0 et 1.

On s'aperçoit qu'une simulation séquentielle est une opération S qui transforme un vecteur uniforme $U = (U_1, U_2, \dots, U_N)$ en un vecteur structuré Z
 20 $= (Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$:

$$Z = S(U) \tag{1}$$

Le problème que représente la contrainte d'un vecteur Z à différents types de données peut être résolu en contraignant les distributions

conditionnelles $F_c(z_i)$ ($i = 1, \dots, N$) et/ou le vecteur uniforme $U = (U_1, U_2, \dots, U_N)$.

Des travaux récents sur l'algorithme séquentiel ont été concentrés sur l'amélioration de l'estimation des distributions conditionnelles $F_c(z_i)$ par
 5 intégration de données géologiques et de données sismiques.

On peut citer par exemple le papier de Zhu, H. et al ; « Formatting and Integrating Soft Data : Stochastic Imaging via the Markov-Bayes Algorithm » in Soares, A., Ed. Geostatistics Troia 92, vol.1 : Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, p.1-12, 1993.

10 Cependant, cette approche ne peut être étendue à l'intégration de données non linéaires comme les pressions issues des tests de puits et les historiques de production, sauf à imposer une sévère linéarisation. En outre, comme toute combinaison de vecteurs uniformes U ne donne pas un vecteur uniforme, la méthode de déformation graduelle d'un modèle stochastique
 15 développée dans le brevet déjà cité, ne peut être directement appliquée dans le cadre de la technique séquentielle rappelée ci-dessus.

Aussi, la méthode selon l'invention permet de rendre compatible les deux approches i.e. d'étendre le formalisme développé dans le brevet précédemment cité, à la déformation graduelle de réalisations, générées par
 20 simulation séquentielle, d'un modèle stochastique non nécessairement gaussien.

Définition de la méthode

La méthode permet de déformer graduellement une représentation ou réalisation, générée par simulation séquentielle, d'un modèle stochastique non

nécessairement gaussien d'une grandeur physique z dans un milieu hétérogène tel qu'une zone souterraine, afin de la contraindre à un ensemble de données collectées dans le milieu par des mesures et observations préalables, relatives à son état ou sa structure.

5 Elle est caractérisée en ce qu'elle comporte l'application d'un algorithme de déformation graduelle d'un modèle stochastique à un vecteur gaussien (Y) ayant un nombre N de variables mutuellement indépendantes qui est relié à un vecteur uniforme (U) à N variables uniformes mutuellement indépendantes par la fonction de répartition gaussienne (G), de façon à définir
10 une chaîne de réalisations $u(t)$ du vecteur (U), et l'utilisation de ces réalisations $u(t)$ pour générer des réalisations $z(t)$ de cette grandeur physique que l'on cale par rapport aux données (non linéaires).

Suivant un premier mode de mise en œuvre, on définit la chaîne de réalisations $u(t)$ du vecteur uniforme (U) à partir d'une combinaison linéaire
15 de réalisations du vecteur gaussien (Y) dont les coefficients de combinaison sont tels que la somme de leurs carrés est égale à l'unité.

Suivant un autre mode de mise en œuvre, on réalise une déformation graduelle d'un nombre n de parties du modèle représentatif du milieu hétérogène tout en préservant la continuité entre ces n parties du modèle, par
20 une subdivision du vecteur uniforme (U) en un nombre n de sous-vecteurs mutuellement indépendants.

D'autres caractéristiques et avantages de la méthode selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'un exemple non limitatif de réalisation, en se référant aux dessins annexés où :

- la Fig.1 montre la couche médiane d'une réalisation d'un modèle de faciès servant de référence, générée par simulation séquentielle d'indicatrices ;
- la Fig.2 montre la variation en fonction du temps de la pression obtenue dans un test de puits du modèle de référence ;
- 5 - les Fig.3A à 3E montrent respectivement cinq réalisations initiales de la couche médiane d'une zone réservoir, contraintes seulement par les faciès le long du puit ;
- les Fig. 4A à 4E montrent respectivement pour ces cinq réalisations, les courbes des pressions au puits dans le modèle de référence comparées à
10 celles correspondant aux modèles initiaux ;
- les Fig.5A à 5E montrent respectivement cinq réalisations de la couche médiane du modèle de faciès conditionnées aux faciès le long du puits et calées par rapport à la courbe de pression obtenue par test de puits ;
- les Fig. 6A à 6E montrent respectivement pour les cinq réalisations, les
15 courbes des pressions au puits dans le modèle de référence comparées à celles correspondant aux modèles calés ;
- les Fig.7A à 7E montrent respectivement comment les fonctions objectif correspondant respectivement à ces cinq exemples, varient avec le nombre d'itérations ;
- 20 - les Fig. 8A à 8E montrent les déformations graduelles opérées par un changement de coefficient d'anisotropie, sur un modèle à trois faciès généré par simulation séquentielle d'indicatrices; et

- les Fig. 9A à 9E montrent les déformations graduelles locales d'un modèle à trois faciès, générées par simulation séquentielle d'indicatrices.

Description détaillée de la méthode

On considère une zone d'étude que l'on subdivise par une grille à N mailles et l'on cherche à construire des réalisations ou représentations d'un modèle stochastique d'une certaine grandeur physique z représentant par exemple la perméabilité des formations dans la zone. Le modèle recherché doit s'ajuster à des données obtenues par des mesures ou observations en un certain nombre de points, et notamment à des données non linéaires.

Le calage d'un modèle stochastique à des données non linéaires peut être formulée comme un problème d'optimisation. On désigne par $f^{obs} = (f_1^{obs}, f_2^{obs}, f_3^{obs} \dots f_p^{obs})$, le vecteur des données non linéaires observées ou mesurées dans le milieu étudié (la zone réservoir), et par $f = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_p)$, le vecteur correspondant des réponses du modèle stochastique de la perméabilité $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$. Le problème de contraindre le modèle stochastique Z par les observations consiste à générer une réalisation z de Z qui réduit à une valeur assez faible une fonction objectif que l'on définit comme la somme des erreurs quadratiques pondérées des réponses du modèle par rapport aux observations ou mesures dans la zone-réservoir, soit :

$$O = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \omega_i (f_i - f_i^{obs})^2$$

où ω_i représente le poids attribué à la réponse f_i . Les fonctions f_i ($i=1, 2, \dots, p$) ainsi que la fonction objectif O sont des fonctions du vecteur Z . On se trouve devant un problème d'optimisation de dimension N .

Pour étendre le formalisme développé dans le brevet déjà cité, à la déformation graduelle de réalisations générées par simulation séquentielle non nécessairement gaussienne, on va partir d'un vecteur gaussien à N variables Y_i avec $i = 1, 2, \dots, N$, mutuellement indépendantes, de moyenne nulle et de variance égale à l'unité, et on va définir N variables uniformes mutuellement indépendantes $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$ par :

$$U_i = G(Y_i) \quad \forall i = 1, 2, \dots, N$$

où G désigne la fonction de répartition gaussienne standardisée.

Ceci posé, on va appliquer l'algorithme de déformation graduelle développé dans un cadre gaussien, au vecteur gaussien $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$, pour construire une chaîne continue de réalisations du vecteur uniforme $U = (U_1, U_2, \dots, U_N)$. Etant donné deux réalisations indépendantes y_a et y_b de Y, on définit la chaîne de réalisations $u(t)$ du vecteur U que l'on obtient selon la relation :

$$u(t) = G(y_a \cos t + y_b \sin t) \quad (2)$$

Pour chaque t, $u(t)$ est une réalisation du vecteur U. Ensuite, par échantillonnage de la distribution conditionnelle $F_c(z_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) en utilisant les éléments du vecteur $u(t)$, on obtient un vecteur $z(t)$ qui est, pour chaque t, une réalisation du vecteur aléatoire Z. En conséquence, on peut ajuster le paramètre t comme dans le cas gaussien de façon à caler $z(t)$ à des données non linéaires. Cette procédure est itérée jusqu'à atteindre un calage satisfaisant.

Calage d'un modèle de faciès à des données de pression obtenues par des tests de puits

Pour illustrer l'application de la méthode d'optimisation stochastique ci-dessus définie, on va chercher à caler un modèle stochastique de réservoir à des données de pressions obtenues par des tests de puits. La construction du modèle de réservoir est dérivée d'une formation pétrolière réelle qui comporte trois types de faciès : deux faciès réservoir de bonne qualité (faciès 1 et 2) et un type de faciès réservoir de très mauvaise qualité (faciès 3). La table 1 définit les propriétés pétrophysiques des trois faciès :

	$K_x(md)$	$K_y(md)$	$K_z(md)$	$\Phi(\%)$	$c_r(10^{-5} bar^{-1})$
faciès 1	10.	10.	10.	17	2.1857
faciès 2	1.	1.	1.	14	2.0003
faciès 3	0.1	0.1	0.001	9	1.8148

10

Pour représenter la distribution spécifique de faciès de la formation pétrolifère, on génère d'abord une réalisation binaire pour représenter le faciès 3 et son complément. Ensuite, dans la partie complémentaire du faciès 3, on génère une autre réalisation binaire indépendante de la première pour représenter les faciès 1 et 2. La formation est discrétisée par un maillage régulier de 60x59x15 blocs de taille 15mx15mx1.5m. Un modèle de variogramme exponentiel est utilisé pour estimer les distributions conditionnelles. La direction d'anisotropie principale est diagonale par rapport au maillage. Les portées du variogramme du faciès 3 selon les trois directions

15

d'anisotropie sont respectivement de 300m, 80m et 3m. Les portées du variogramme des faciès 1 et 2 selon les trois directions d'anisotropie sont respectivement de 150m, 40m et 1.5m. Les proportions des faciès 1, 2, 3 sont respectivement de 6%, 16% et 78%.

5 On a réalisé un test de puits au moyen d'un simulateur de test de puits à différences finies, de la manière décrite par :

Blanc, G. et al : « Building Geostatistical Models Constrained by Dynamic Data - A Posteriori Constraints » in SPE 35478, Proc. NPF/SPE European 3D Reservoir Modelling Conference, Stavenger, Norway, 1996.

10 On voit sur la Fig.1 la couche médiane d'une réalisation qui sert de modèle de référence pour cette validation. La section du puits qui a été perforée traverse horizontalement la couche médiane du modèle de réservoir le long de l'axe x. Le diamètre du puits est de 7.85cm, la capacité du puits est nulle et les facteurs pariétaux (skin) des faciès 1, 2 et 3 sont respectivement 0,
15 3 et 50. Le test de puits synthétique dure 240 jours avec un débit constant de 5 m³/jour de façon à investiguer presque la totalité du champ pétrolifère. La Fig.2 montre la variation de pression en fonction du temps.

 Le but était de construire des réalisations du modèle de faciès contraint par les faciès rencontré le long du puits et par la courbe de pression obtenue
20 lors du test de puits. La fonction objectif est définie comme la somme des différences quadratiques entre les réponses en pression du modèle de référence et les réponses en pression de la réalisation. Du fait que le comportement dynamique du modèle de réservoir est principalement contrôlé par le contraste entre les faciès réservoir de bonne et de mauvaise qualités, la réalisation
25 binaire utilisée pour générer les faciès 1 et 2 a été fixée d'abord et seule la

réalisation binaire utilisée pour générer le faciès 3 a été déformée pour le calage des données de pression.

Les réponses en pression résultant des tests de puits pour les cinq réalisations des Fig.3A à 3E, sont différentes de celle du modèle de référence, comme le montrent les Fig. 4A à 4E. Partant respectivement de ces 5 réalisations indépendantes, en utilisant la méthode de calage itératif ci-dessus, on obtient après quelques itérations, cinq réalisations calées (Fig. 5A à 5E) pour lesquelles les courbes de pression correspondantes sont tout à fait en accord avec celles du modèle de référence, comme le montrent les Fig.6A à 6E.

Déformation graduelle par rapport aux paramètres structuraux

Dans de nombreux cas, on ne dispose pas de données suffisantes pour en déduire les paramètres structuraux du modèle stochastique : moyenne, variance, fonction de covariance, etc. Ces paramètres structuraux sont souvent donnés en termes d'intervalles ou de distributions a priori. Si leurs valeurs sont fausses, il est vain de rechercher une réalisation calée sur des données non linéaires. Aussi, il est essentiel pour les applications de pouvoir procéder à une déformation graduelle d'une réalisation avec modification simultanée de nombres aléatoires et des paramètres structuraux. L'algorithme de simulation séquentielle définie par l'équation (1) fournit cette possibilité de changer simultanément ou séparément l'opérateur structurel S et le vecteur uniforme U . Les Fig.8A-8E montrent les déformations graduelles que l'on obtient pour une réalisation fixe du vecteur uniforme U quand on change le coefficient d'anisotropie.

Déformation graduelle locale ou régionalisée

Quand les observations sont réparties sur des zones différentes d'une formation étudiée, un calage qui utiliserait une déformation globale risquerait d'être inefficace car l'amélioration de l'accord que l'on obtiendrait sur une zone pourrait le détériorer sur une autre zone. Il est donc bien préférable d'appliquer des déformations graduelles zone par zone. On considère une subdivision du vecteur U en un certain nombre n de sous-vecteurs U^1, U^2, \dots, U^n mutuellement indépendants ce qui rend possible de réaliser individuellement leur déformation graduelle. En appliquant séparément à chacun des sous-vecteurs U^1, U^2, \dots, U^n , l'algorithme de déformation graduelle, on obtient une fonction de dimension n , du vecteur uniforme U :

$$U(t_1, t_2, \dots, t_n) = \begin{bmatrix} U^1(t_1) \\ U^2(t_2) \\ \vdots \\ U^n(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G(Y_a^1 \cos t_1 + Y_b^1 \sin t_1) \\ G(Y_a^2 \cos t_2 + Y_b^2 \sin t_2) \\ \vdots \\ G(Y_a^n \cos t_n + Y_b^n \sin t_n) \end{bmatrix}$$

où Y_a^i et Y_b^i pour tout $i = 1, 2, \dots, n$, sont des sous-vecteurs gaussiens indépendants. Pour un ensemble de réalisations de Y_a^i et Y_b^i , on résout un problème d'optimisation de n paramètres t_1, t_2, \dots, t_n pour obtenir une réalisation qui améliore, sinon maintient, le calage des données. Cette procédure peut être itérée jusqu'à atteindre un calage satisfaisant.

En réalisant des déformations locales graduelles, on améliore de façon significative la vitesse de calage dans tous les cas où les mesures ou observations sont réparties dans différentes zones du milieu.

On voit bien l'effet de cette déformation locale graduelle sur le modèle à trois faciès, des Fig. 9A à 9E où seule la partie inférieure gauche délimitée est affectée.

La méthode selon l'invention peut être facilement généralisée à la
5 déformation graduelle d'une représentation ou réalisation d'un modèle stochastique quelconque, car générer une réalisation d'un tel modèle stochastique se ramène toujours à la génération des nombres uniformes.

REVENDICATIONS

• 1) Méthode pour déformer graduellement une représentation ou
5 réalisation, générée par simulation séquentielle, d'un modèle stochastique non
nécessairement gaussien d'une grandeur physique z dans un milieu hétérogène
tel qu'une zone souterraine, afin de la contraindre à un ensemble de données
collectées dans le milieu par des mesures et observations préalables, relatives à
son état ou sa structure, caractérisée en ce qu'elle comporte l'application d'un
10 algorithme de déformation graduelle d'un modèle stochastique à un vecteur
gaussien (Y) à N variables mutuellement indépendantes qui est relié à un
vecteur uniforme U à N variables uniformes mutuellement indépendantes par
la fonction de répartition gaussienne (G), de façon à construire une chaîne de
réalisations $u(t)$ du vecteur U , et l'utilisation de ces réalisations $u(t)$ pour
15 générer des réalisations $z(t)$ de cette grandeur physique, que l'on cale par
rapport aux données.

◦ 2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'on définit
une chaîne de réalisations $u(t)$ du vecteur (U) à partir d'une combinaison
linéaire de réalisations du vecteur gaussien (Y) dont les coefficients de
20 combinaison sont tels que la somme de leurs carrés est égale à l'unité.

◦ 3) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce qu'elle
comporte une déformation graduelle du modèle représentatif du milieu
hétérogène, simultanément par rapport aux paramètres structuraux et aux
nombres aléatoires.

- ° 4) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce qu'elle comporte une déformation graduelle séparée d'un nombre n de parties du modèle représentatif du milieu hétérogène tout en préservant la continuité entre ces n parties du modèle, par une subdivision du vecteur uniforme en n sous-vecteurs mutuellement indépendants.
- 5

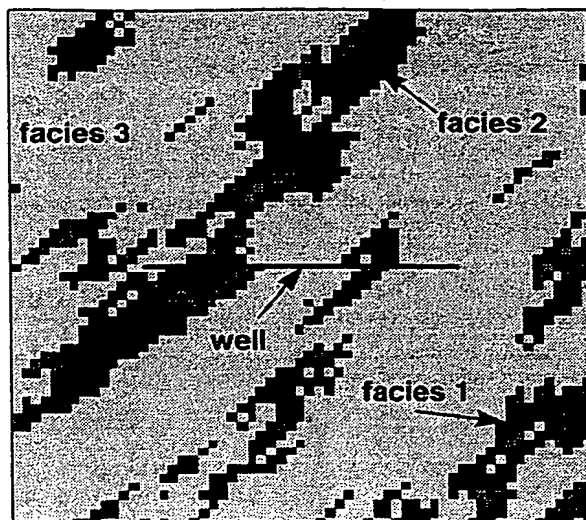


Fig. 1

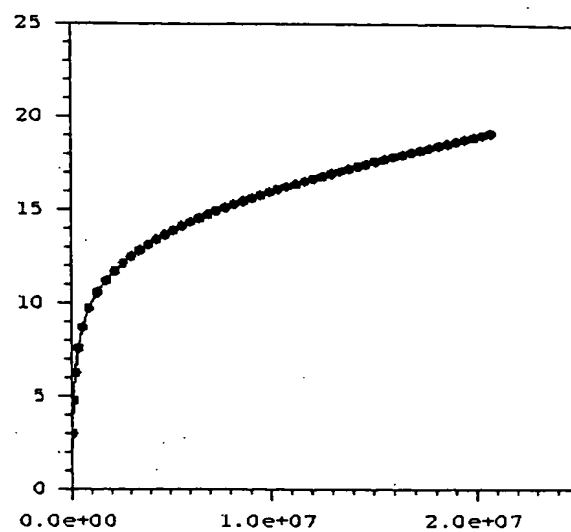


Fig. 2



Fig.3A



Fig.3B

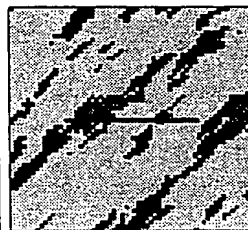


Fig.3C

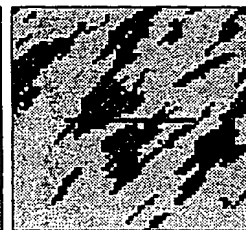


Fig.3D

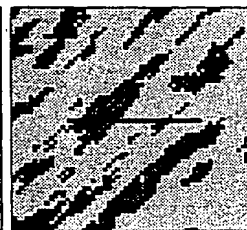


Fig.3E

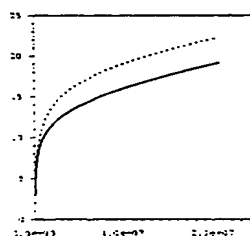


Fig.4A

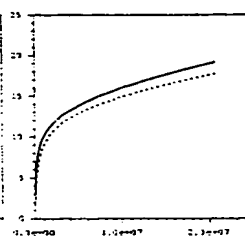


Fig.4B

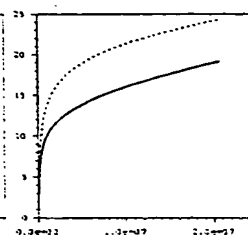


Fig.4C

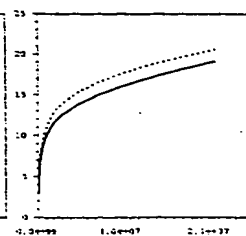


Fig.4D

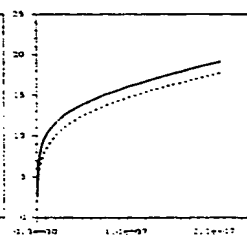


Fig.4E



Fig. 5A

Fig. 5B

Fig. 5C

Fig. 5D

Fig. 5E

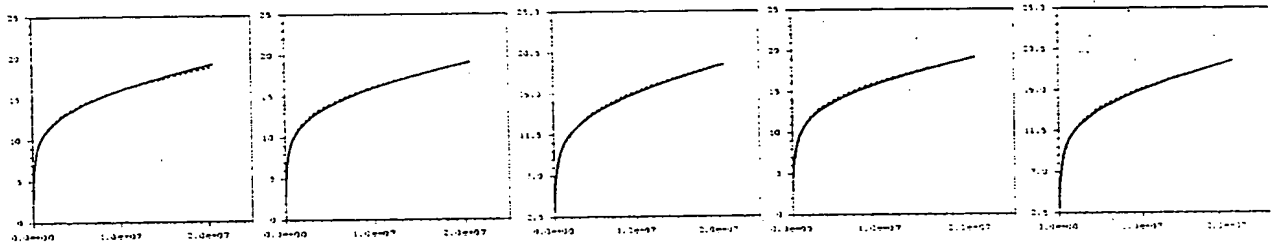


Fig. 6A

Fig. 6B

Fig. 6C

Fig. 6D

Fig. 6E

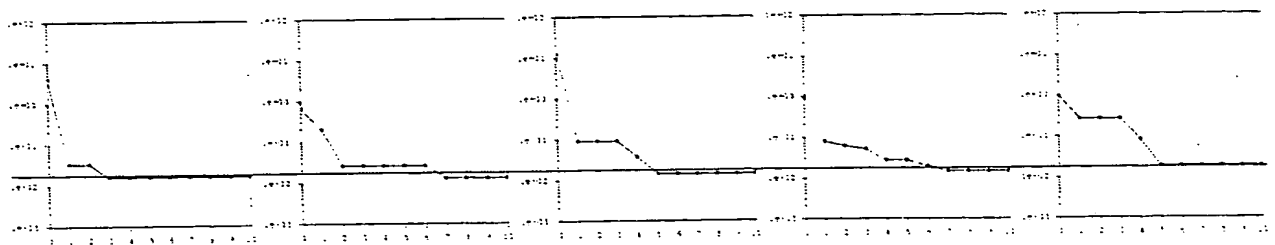


Fig. 7A

Fig. 7B

Fig. 7C

Fig. 7D

Fig. 7E



Fig.8A

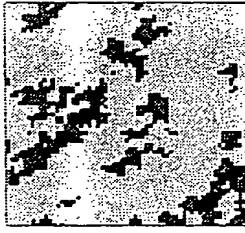


Fig.8B



Fig.8C

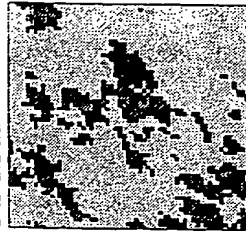


Fig.8D



Fig.8E

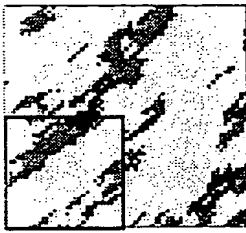


Fig.9A

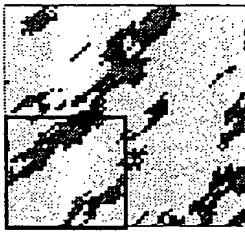


Fig.9B

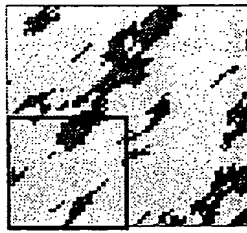


Fig.9C

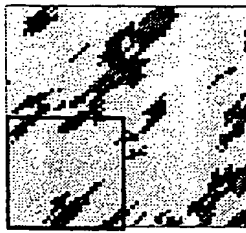


Fig.9D

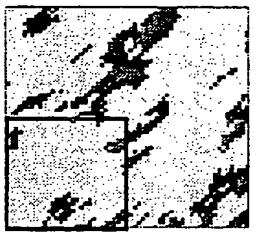


Fig.9E